BRANDUOLINĖS ENERGETIKOS FIZIKINIAI PAGRINDAI

Viktorija Tamulienė

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas

2015 ruduo
III paskaita

Turinys

1. Rentgeno spinduliai
   - Elektromagnetiniai spinduliai
   - Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
   - Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
   - Mozlio dėsnis
   - Rentgeno spindulių taikymas

2. Įvadas į atomo branduolio fiziką
   - Istorinis įvadas
   - Nukleonai
   - Branduolio sandara
   - Branduolio spindulys ir tankis
   - Mikropasaulio reiškinių masteliai

Turinys

1. Rentgeno spinduliai
   - Elektromagnetiniai spinduliai
   - Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
   - Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
   - Mozlio dėsnis
   - Rentgeno spindulių taikymas

2. Įvadas į atomo branduolio fiziką
   - Istorinis įvadas
   - Nukleonai
   - Branduolio sandara
   - Branduolio spindulys ir tankis
   - Mikropasaulio reiškinių masteliai

Rentgeno spinduliai

1895 m. vokiečių fizikas V. Rentgenas atrado spindulius, kurių bangos ilgis trumpesnis už ultravioletinių. Jie vėliau buvo pavadinti Rentgeno arba X spinduliais. Už šių spindulių atradimą 1901 m. V. Rentgenas tapo pirmuoju Nobelio premijos laureatu.

Rentgeno spinduliai yra elektromagnetiniai jonizuojantys spinduliai, kurių bangos ilgis $\lambda = 10^{-14} - 10^{-8}$ m. Trumpieji Rentgeno spinduliai $\lambda < 0,2$ nm yra labai skvarbūs ir todėl vadinami *kietaisiais*, o ilgieji – mažiau skvarbūs ir vadinami *minkštaisiais*.



V. Rentgenas. 1901 Nobelio premija.

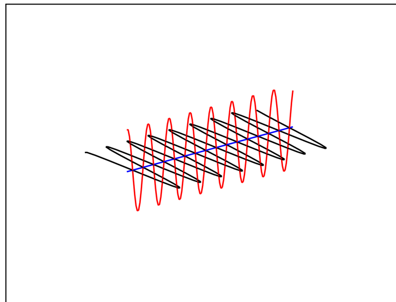
Turinys

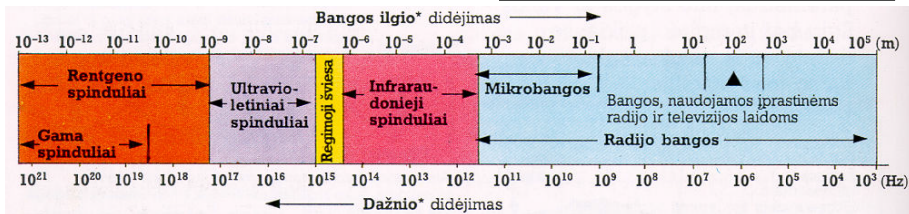
1. Rentgeno spinduliai
   - Elektromagnetiniai spinduliai
   - Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
   - Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
   - Mozlio dėsnis
   - Rentgeno spindulių taikymas
2. Įvadas į atomo branduolio fiziką
   - Istorinis įvadas
   - Nukleonai
   - Branduolio sandara
   - Branduolio spindulys ir tankis
   - Mikropasaulio reiškinių masteliai

Elektromagnetiniai spinduliai

Elektrinis laukas

Magnetinis laukas





Elektromagnetiniai spinduliai

- Siekdamas paaiškinti absoliučiai juodo kūno spinduliuotės eksperimentinius dėsningumus, vokiečių fizikas Maksas Plankas (Planck) 1900 m. padarė prielaidą, kad harmoninio osciliatoriaus energija ε gali būti ne bet kokia, o lygi diskrečioms vertėms, kurios yra tam tikro dydžio ε_1 kartotiniai:

Šviesos energijos kvantavimas

$$\varepsilon \equiv \varepsilon_n = n\varepsilon_1 \ (n = 0, 1, 2, ...). \quad (1)$$

Dydis ε_1 šiame reiškinyje – tai mažiausioji duotojo dažnio spinduliuotės energijos porcija, kuri vadinama energijos kvantu. Taigi, osciliatoriaus energija yra diskreti (kvantuota).

Elektromagnetiniai spinduliai

- Siekiant paaiškinti eksperimentinę absoliučiai juodo kūno spinduliuotės energijos spektrinio tankio $W_{\lambda,T}$ priklausomybę nuo bangos ilgio λ, teko padaryti prielaidą, kad osciliatoriaus energijos kvantas ε_1 yra proporcingas osciliatoriaus dažniui ν. Proporcingumo koeficientas vadinamas Planko konstanta ir žymimas h:

Fotono energija

$$\varepsilon_1 = h\nu = \hbar\omega; \tag{2}$$

čia $\omega = 2\pi\nu$ yra kampinis dažnis, o $\hbar = h/2\pi$ yra redukuotoji Planko konstanta. Planko konstanta lygi $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ J·s.

- Kadangi $\nu = c/\lambda$, kur c yra šviesos greitis, tai osciliatoriaus energijos kvantą galime išreikšti ir šitaip:

Fotono energija

$$\varepsilon_1 = h\frac{c}{\lambda}. \tag{3}$$

Elektromagnetiniai spinduliai

- M. Planko hipotezės pagrindu vokiečių fizikas Albertas Einšteinas (Einstein) 1905 m. sukūrė šviesos kvantinę (fotoninę) teoriją. Remiantis Einšteinu, elektromagnetinė spinduliuotė egzistuoja diskrečių energijos porcijų pavidalu. Elektromagnetinės spinduliuotės energijos kvantą galima laikyti materialia dalele, kuri juda šviesos greičiu c ir perneša energiją

Fotono energija

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}. \tag{4}$$

Ši dalelė vadinama *fotonu*.

Elektromagnetiniai spinduliai

- Kadangi fotonas veikia kaip materiali dalelė, tai jis turi masę ir judesio kiekį. Fotono masę m_f galima išreikšti pasinaudojus reliatyvistiniu energijos ir masės sąryšiu: $h\nu = m_f c^2$. Iš čia

Fotono masė

$$m_f = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}. \tag{5}$$

- Reikia turėti omenyje, kad tai yra šviesos greičiu judančio fotono masė: fotono rimties masė lygi nuliui. Tuo fotonas skiriasi nuo materialiųjų dalelių (tokių kaip elektronas, protonas ir neutronas), kurių rimties masė nelygi nuliui ir kurios gali būti rimties būsenos. Fotonas negali būti rimties būsenos, o jo greitis visada lygus šviesos greičiui c.

Elektromagnetiniai spinduliai

- Fotono judesio kiekis p_f (masės ir greičio sandauga) yra

Fotono judesio kiekis

$$p_f = m_f c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \tag{6}$$

Fotono judesio kiekio vektorius $\mathbf{p}_f$ susijęs su jo bangos vektoriumi $\mathbf{k}$ šitaip:

Fotono judesio kiekis

$$\mathbf{p}_f = \hbar\mathbf{k}. \tag{7}$$

Elektromagnetiniai spinduliai

Taigi, elektromagnetinę spinduliuotę galima apibūdinti ne vien bangų parametrais λ ir ν, bet ir dydžiais m_f ir p_f, kurie mechanikoje vartojami apibūdinant materialiųjų dalelių judėjimą. Tai rodo, kad elektromagnetinio spinduliavimo reiškiniuose pasireiškia bangos-dalelės dvejopumas (angl. wave-particle duality): vieni reiškiniai (interferencija, difrakcija ir poliarizacija) rodo, kad elektromagnetinė spinduliuotė yra banginis procesas, o kiti reiškiniai (šiluminės spinduliuotės savybės, fotoefektas ir Komptono efektas) rodo, kad elektromagnetinė spinduliuotė yra diskretusis, arba kvantinis, procesas, kurį sukelia atskirų dalelių (fotonų) veikimas.

Rentgeno spinduliai

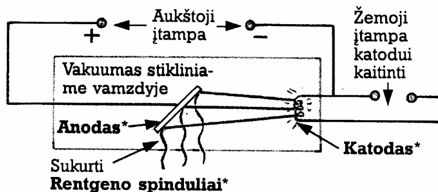
- Yra dirbtiniai ir gamtiniai Rentgeno spindulių šaltiniai. Gamtiniai šaltiniai – tai radioaktyvieji izotopai, Saulė ir kiti kosminiai kūnai. Plazma taip pat yra Rentgeno spinduliuotės šaltinis. Kosminiai Rentgeno spinduliai gali susidaryti ir dėl atvirkštinio Komptono reiškinio: kai elektromagnetinius spindulius sklaido didelės energijos elektronai, po susidūrimo fotonų energija gali padidėti elektrono energijos sąskaita.
- Dirbtiniuose šaltiniuose Rentgeno spinduliai išspinduliuojami stabdant greitas elektringąsias daleles, dažniausiai elektronus. Taip Rentgeno spinduliai susidaro Rentgeno vamzdžiuose, kineskopuose, elektroniniuose vamzdžiuose, elektroninėse lempose. Rentgeno vamzdis – tai vakuuminis prietaisas, specialus elektroninis vamzdis.

Turinys

1. Rentgeno spinduliai
   - Elektromagnetiniai spinduliai
   - Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
   - Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
   - Mozlio dėsnis
   - Rentgeno spindulių taikymas
2. Įvadas į atomo branduolio fiziką
   - Istorinis įvadas
   - Nukleonai
   - Branduolio sandara
   - Branduolio spindulys ir tankis
   - Mikropasaulio reiškinių masteliai

Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas

Rentgeno vamzdis



Jo pagrindinės dalys yra elektronų šaltinis – katodas ir Rentgeno spindulių šaltinis – anodas arba antikatodas, patalpinti sandariame stiklo arba metalo balione. Anodas gaminamas iš sunkiųjų metalų (W, Cu, Pt ir kt.). Elektronus greitina tarp katodo ir anodo sudaryta aukšta įtampa. Ji gali būti nuo kelių dešimčių kilovoltų (kV) iki milijonų voltų (MV). Katodas gali būti šaltas arba kaitinamas, kad geriau vyktų elektronų emisija. Greitieji elektronai (katodiniai spinduliai), susidūrę su anodu, yra stabdomi. Didžioji elektronų energijos dalis virsta šiluma ir tik apie 0,1-5% – Rentgeno spinduliais. Šitaip gautas Rentgeno spinduliavimas vadinamas *stabdomuoju*.

Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas

Stabdomosios spinduliuotės spektras yra ištisinis, nes procesas yra atsitiktinis – įvairių elektronų skirtinga energijos dalis virsta Rentgeno spindulių kvantais. Tačiau ištisinis spektras trumpųjų bangų srityje turi nuo antikatodo medžiagos nepriklausančią ribą – krizinį (minimalų) ilgį λ_k, nuo kurio spektras nutrūksta. Empiriškai nustatyta, kad λ_k su elektronus greitinančiąja įtampa U sieja tokia lygybė:

Krizinis bangos ilgis

$$\lambda_k = \frac{12,390}{U} \text{Å}; \tag{8}$$

čia bangos ilgis λ matuojamas angstremais ($1\text{Å} = 10^{-10}$ m), o įtampa – kilovoltais.

Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas

Šią priklausomybę paaiškina kvantinė teorija: stabdomo elektrono išspinduliuoto Rentgeno spindulių kvanto energija $h\nu$ negali būti didesnė už elektriniame lauke įgytą elektrono energiją eU, t.y. $h\nu_k = eU$, arba

Krizinis bangos ilgis

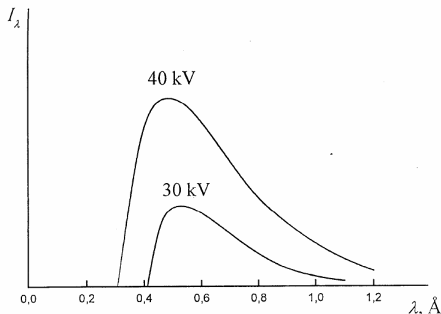
$$\lambda_k = \frac{c}{\nu_k} = \frac{hc}{eU} = \frac{1,239 \cdot 10^{-9}\mathrm{m}}{U}. \quad (9)$$

Čia įtampa U matuojama kilovoltais, o bangos ilgis – metrais.

Taigi, trumpabangės ribos bangos ilgis λ_k yra atvirkščiai proporcingas elektronus greitinančiai įtampai. Radijo lempose $U \approx 100$ V, o stabdomojo Rentgeno spektro trumpabangė riba $\lambda_k \approx 100$ Å. Tai minkštieji Rentgeno spinduliai ir juos stiklinis arba metalinis balionas visiškai sugeria. Televizorių kineskopuose $U \approx 10$ kV, todėl $\lambda_k \approx 1$ Å. Šie Rentgeno spinduliai skvarbesni ir apsaugai nuo jų gaminami kineskopai su pakankamai storomis sienelėmis.

Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas

- Iš bandymų nustačius λ_k ir U, pagal formulę (9) galima apskaičiuoti Planko konstantą. Tai vienas tiksliausių jos nustatymo būdų.
- Didėjant bangos ilgiui nuo λ_k, stabdomosios Rentgeno spinduliuotės intensyvumas, tenkantis vienetiniam bangos ilgių intervalui, didėja, pasiekia maksimumą, kai $\lambda_{\max} \approx 3\lambda_k/2$ ir asimptotiškai mažėja artėdamas į nulį didėjant λ.



Stabdomosios Rentgeno spinduliuotės intensyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio skirtingoms elektronus greitinančioms įtampoms.

Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas

Stabdomojo spinduliavimo intensyvumas proporcingas elektrono pagreičio kvadratui. Elektronas juda atomo branduolio, kurio krūvis Ze, kuloniniame lauke ir jį veikia Kulono jėga proporcinga Z. Pagreitis atvirkščiai proporcingas dalelės masei m. Taigi, atomo branduolio lauke judanti dalelė per laiko vienetą išspinduliuoja energijos kiekį

Stabdomieji energijos nuostoliai

$$\frac{dE}{dt} \propto \frac{Z^2}{m^2}, \qquad (10)$$

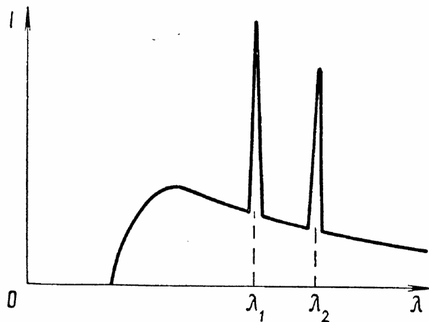
t.y. tiesiog proporcingą anodo atomų eilės numeriui periodinėje lentelėje kvadratui (Z^2) ir atvirkščiai proporcingą stabdomų dalelių masės kvadratui ($1/m^2$). Todėl lengvųjų dalelių (elektronų) stabdomieji energijos nuostoliai yra žymiai didesni negu sunkiųjų dalelių (protonų, α dalelių). O ištisinio spektro Rentgeno spinduliuotės gavimui naudingiau naudoti anodus, pagamintus iš sunkių elementų, pavyzdžiui volframo ($Z = 74$).

Turinys

1. Rentgeno spinduliai
   - Elektromagnetiniai spinduliai
   - Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
   - Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
   - Mozlio dėsnis
   - Rentgeno spindulių taikymas
2. Įvadas į atomo branduolio fiziką
   - Istorinis įvadas
   - Nukleonai
   - Branduolio sandara
   - Branduolio spindulys ir tankis
   - Mikropasaulio reiškinių masteliai

Būdingoji Rentgeno spinduliuotė

Į anodą krintančių elektronų energijai viršijus tam tikrą ribą, ištisinės spinduliuotės fone pasirodo spektras, sudarytas iš atskirų linijų. Šis linijinis spektras būdingas elektrodus sudarančiai medžiagai, todėl vadinamas *būdinguoju spektru*.

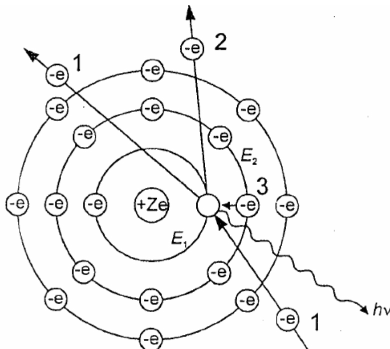


Būdingojo rentgeno spektro pasirodymas ištisinio spektro fone.

Būdingoji Rentgeno spinduliuotė

Nustatyta, kad būdingosios spinduliuotės spektro linijos yra susitelkusios į serijas, panašiai kaip vandenilio atomo spektro linijos. Jos vadinamos K, L, M, N ir t.t. serijomis. Kiekviena serija sudaryta iš keleto linijų. Jos žymimos raidėmis α, β, γ, ... atitinkamai didėjančiam spinduliavimo dažniui, t.y. K_α, K_β, K_γ, ... L_α, L_β, L_γ ir t.t. Šių serijų susidarymą paaiškina anksčiau nagrinėti atomo kvantinių būsenų dėsningumai. Į atomą pataikius didelės energijos elektronui, K sluoksnio elektronas gali gauti iš smogiančiojo elektrono energijos kiekį, pakankamą išlėkti iš atomo. Atomo K sluoksnyje susidaro skylė (vakansija).

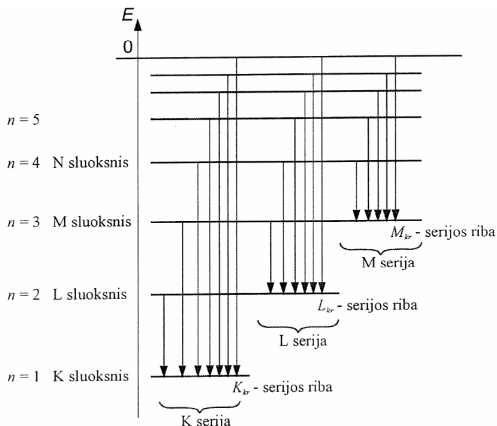
Būdingoji Rentgeno spinduliuotė



Charakteringosios Rentgeno spinduliuotės atsiradimo schema. Į anodą krintantis 1 elektronas išmuša iš atomo vidinio sluoksnio 2 elektroną. Į atsiradusią vakansiją peršoka vienas tolimesnių sluoksnių 3 elektronas išspinduliuodamas šuolio metu Rentgeno spektro fotoną.

Būdingoji Rentgeno spinduliuotė

Tokio atomo kitų sluoksnių elektronams šokant į K sluoksnyje susidariusią vakansiją, išspinduliuojama K serijos atitinkama spektro linija – peršokant iš L sluoksnio – K_α, iš M sluoksnio – K_β, iš N sluoksnio – K_γ ir t.t. Kai apšaudant atomą elektronais vakansija susidaro L sluoksnyje, ją užimant M, N, O ar kito tolimesnio sluoksnio elektronams, spinduliuojamos L serijos spektro linijos L_α, L_β, L_γ ir t.t..



Rentgeno spinduliuotės spektro linijų serijų kilmės schema.

Turinys

1. Rentgeno spinduliai
   - Elektromagnetiniai spinduliai
   - Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
   - Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
   - Mozlio dėsnis
   - Rentgeno spindulių taikymas
2. Įvadas į atomo branduolio fiziką
   - Istorinis įvadas
   - Nukleonai
   - Branduolio sandara
   - Branduolio spindulys ir tankis
   - Mikropasaulio reiškinių masteliai

Mozlio dėsnis

Stebėjimai rodo, kad įvairių elementų būdingieji Rentgeno spektrai yra panašūs, tik didėjant atominiam skaičiui Z, atitinkamos spektro linijos slenka trumpųjų bangų link. 1913 m. anglų fizikas H. Mozlis (Moseley) empiriškai atrado paprastą priklausomybę, siejančią Rentgeno būdingosios spinduliuotės linijos dažnį su elemento eilės numeriu:

Mozlio dėsnis

$$\nu = R(Z-\sigma)^2\left(\frac{1}{n^2}-\frac{1}{m^2}\right); \tag{11}$$

čia R – Rydbergo konstanta, σ – ekranavimo konstanta: K serijos linijoms σ apytiksliai lygi 1, L serijos linijoms $\sigma \approx 7,5$ ir t.t. K serijai $n = 1$, o $m = 2$, 3, 4, ... atitinkamai K_α, K_β, K_γ , ... linijoms. L serijai $n = 2$, o $m = 3$, 4,... ir t.t.

Mozlio dėsnis

- Formulė (11) seka iš vandeniliško atomo energijos lygmenis aprašančių išraiškų. Ekranavimo konstanta σ atspindi branduolio lauko susilpninimą dėl branduolį supančių elektronų įtakos.
- Mozlio dėsnis dažnai užrašomas ne dažniui, kaip formulėje (11), bet bangos skaičiui $k = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$, arba pavidalu

Mozlio dėsnis

$$\sqrt{\nu} = \alpha(Z - \sigma), \tag{12}$$

čia α – kiekvienai linijų serijai būdinga konstanta. Tuomet Mozlio dėsnis skamba taip: *kvadratinė šaknis iš dažnio yra atominio skaičiaus Z tiesinė funkcija*.

Mozlio dėsnis

- Pažymėtina, kad būdingosios Rentgeno spinduliuotės spektras beveik nepriklauso nuo to, ar elementas yra laisvas, ar cheminio junginio sudėtyje, ar kristale. Pavyzdžiui, jodo atomo ir jodo molekulės būdingieji spektrai yra vienodi. Būdingųjų Rentgeno spektrų dėsningumai patvirtina elektronų sluoksninį pasiskirstymą atome.
- Naudojant didelės gebos prietaisus galima pastebėti būdingojo Rentgeno spektro multipletinę sandarą: kiekviena linija yra sudaryta iš dviejų arba dargiau artimų linijų. Tokią sandarą sąlygoja atomo vidinių energijos lygmenų multipletiškumas: elektrono energija daugiaelektroniame atome priklauso ne tik nuo pagrindinio kvantinio skaičiaus, bet ir nuo orbitinio ir sukininio kvantinių skaičių, o daugelio elektronų sistemos – nuo termo. Spinduliuojamos linijos bangos dažnis priklauso ne tik nuo sluoksnių, bet ir nuo termų, tarp kurių vyksta elektrono šuolis.

Turinys

1. Rentgeno spinduliai
   - Elektromagnetiniai spinduliai
   - Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
   - Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
   - Mozlio dėsnis
   - Rentgeno spindulių taikymas
2. Įvadas į atomo branduolio fiziką
   - Istorinis įvadas
   - Nukleonai
   - Branduolio sandara
   - Branduolio spindulys ir tankis
   - Mikropasaulio reiškinių masteliai

Rentgeno spindulių taikymas

- Rentgeno spinduliai praeina pro daugelio kūnų storus sluoksnius, nors priklausomai nuo medžiagos storio praėjusių spindulių, intensyvumas mažėja eksponentiškai (Bugerio dėsnis):

Bugerio dėsnis

$$I = I_0 \exp(-\kappa d); \qquad (13)$$

čia I_0 – krintančių Rentgeno spindulių intensyvumas, I – praėjusių d storio medžiagos sluoksnį spindulių intensyvumas, κ – slopimo koeficientas.

Rentgeno spindulių taikymas

- Rentgeno spinduliai slopsta dėl fotoefekto – elektronų išlaisvinimo (jonizacijos) atomui sugėrus fotoną ir Komptono reiškinio – fotonų sklaidos elektronais. Praktiniu požiūriu svarbiausio diapazono ($\lambda = 0,2 - 2$ Å) Rentgeno spinduliai silpsta dėl fotoefekto, ir slopimo koeficientas labai priklauso nuo elemento atominio skaičiaus Z ir bangos ilgio, t.y.

Slopimo koeficientas

$$\kappa = CZ^4\lambda^3, \tag{14}$$

čia konstanta C priklauso nuo medžiagos tankio. Šiuo sąryšiu pagrįsta *Rentgeno defektoskopija* ir *Rentgeno diagnostika*. Šiems tikslams tinka stabdomoji Rentgeno spinduliuotė.

Rentgeno spindulių taikymas

- **Rentgeno defektoskopija** yra metodas, kuriuo pagal pro kūną praėjusių Rentgeno spindulių intensyvumą randami neskaidrūs objektai, įtrūkiai, intarpai, poros.
- **Rentgeno diagnostika** – žmogaus ir gyvūnų ligų bei organų pakitimų nustatymas, panaudojant Rentgeno spindulius. Įvairūs organai skirtingai sugeria Rentgeno spindulius ir dėl to jie yra matomi Rentgeno aparato ekrane arba nuotraukose. Peršviečiant objektą dviejų Rentgeno šaltinių spinduliais galima atstatyti objekto erdvinį vaizdą.
- Charakteringųjų Rentgeno spindulių difrakcijos reiškiniu paremti *kristalų sandaros* tyrimo metodai.
- Rentgeno spindulių biologinis veikimas taikomas *rentgenoterapijoje*. Rentgeno spinduliai ardo navikus, slopina jų augimą, nuskausmina. Kuriami Rentgeno mikroskopai ir kiti prietaisai, kuriuose panaudojamos Rentgeno spinduliuotės unikalios savybės – skvarbumas ir didelė skiriamoji geba.

Turinys

1 Rentgeno spinduliai
- Elektromagnetiniai spinduliai
- Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
- Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
- Mozlio dėsnis
- Rentgeno spindulių taikymas

2 Įvadas į atomo branduolio fiziką
- Istorinis įvadas
- Nukleonai
- Branduolio sandara
- Branduolio spindulys ir tankis
- Mikropasaulio reiškinių masteliai

Turinys

1. Rentgeno spinduliai
   - Elektromagnetiniai spinduliai
   - Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
   - Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
   - Mozlio dėsnis
   - Rentgeno spindulių taikymas
2. Įvadas į atomo branduolio fiziką
   - Istorinis įvadas
   - Nukleonai
   - Branduolio sandara
   - Branduolio spindulys ir tankis
   - Mikropasaulio reiškinių masteliai

Įvadas į atomo branduolio fiziką. Istorinis įvadas

- Branduolio fizikos pradžia laikytinas radioaktyvumo atradimas.
- XIX a. pabaigoje daugelis fizikų domėjosi išlydžiais praretintose dujose ir su jais susijusiais reiškiniais. Juos tirdamas, Rentgenas 1895 m. atrado naujus nematomus, bet labai skvarbius spindulius, kuriuos pavadino X spinduliais. Dabar Lietuvoje ir daugelyje kitų kraštų jie vadinami Rentgeno spinduliais.
- Pirmuose jo eksperimentuose Rentgeno spinduliai atsirasdavo toje stiklinio išlydžio vamzdelio su labai praretintu oru vietoje, kurioje katodiniai spinduliai atsitrenkdavo į vamzdelio sienelę. Elektronų srauto (katodinių spindulių) bombarduojama stiklo sienelė fluorescuodavo, o stikle stabdomi elektronai sužadindavo Rentgeno spindulius. Taip buvo pastebėtas ryšys tarp Rentgeno spindulių ir fluorescencijos. Tai paskatino prancūzų mokslininką A. Puankare (H. Poincare) padaryti prielaidą, kad X spindulių šaltinis gali būti bet kokia fluorescuojanti medžiaga.

Istorinis įvadas

- Šios minties pagautas A. A. Bekerelis (A. H. Becquerel) ir keli kiti mokslininkai pradėjo ieškoti X spindulių, neva galinčių atsirasti fluorescencijos, sužadintos įvairiais kitais būdais, metu. Eksperimentuojant su fluorescuojančio cinko ir kalcio sulfidais Rentgeno spindulių negauta. A. A. Bekerelis darė bandymus su urano druskomis, stipriai fluorescuojančiomis nuo ultravioletinių spindulių. Jis apšviesdavo elektrinio lanko šviesa įvairius cheminius urano junginius bei kristalus, prie pat jų laikydamas į juodą popierių įvyniotą fotografinę plokštelę. Jei būtų atsiradę X spindulių, jie pereitų per popierių ir paveiktų plokštelę, o ją išryškinus būtų matomas pajuodavimas.
- Eksperimentas, atliktas su urano druska UKSO, pavyko – plokštelė iš tikrųjų pajuodavo. Vadinasi, šis junginys tikrai skleidžia skvarbius, panašius į Rentgeno spindulius. Tačiau toliau tiriant urano junginius, paaiškėjo, kad skvarbioji spinduliuotė yra ir tuomet, kai druska neapšviečiama bei nefluorescuoja ir net tada, kai ji prieš eksperimentą ilgai laikoma tamsoje!

Istorinis įvadas

- Vėliau A. A. Bekerelis ištyrė, kad šios skvarbiosios spinduliuotės šaltinis yra uranas, o spinduliuotė visai nesusijusi su fluorescencija. Šiuos spindulius Bekerelis pavadino urano spinduliais.
- Prancūzų fizikai Pjeras Kiuri (P. Curie) ir Marija Sklodovskaja-Kiuri nustatė, kad panašius spindulius skleidžia toris, polonis, o ypač intensyviai – radis. Todėl šiuos spindulius skleidžiančios medžiagos buvo pavadintos *radioaktyviomis*, o jų savybė spinduliuoti – *radioaktyvumu*.
- Iš pradžių radioaktyvioji spinduliuotė buvo tiriama fotografiniu metodu, stebint fotoplokštelės pajuodavimą. Tai buvo nepatogus ir lėtas tyrimo būdas. M. Kiuri spinduliuotei registruoti vartojo daug spartesnį ir tikslesnį elektrinį metodą. Kadangi radioaktyvieji spinduliai, panašiai kaip ir Rentgeno, jonizuoja orą, spinduliuotės intensyvumą galima matuoti pagal dujose susidariusių jonų kiekį jonizacijos kameromis ir atitinkamai pritaikytais elektroskopais bei elektrometrais. Šis elektrinis metodas labai palengvino ir pagreitino matavimus bei tyrimus.

Istorinis įvadas

- Kiuri netrukus pastebėjo, kad Čekijoje randama gamtinė dervinė rūda, iš kurios gaunamas uranas, yra 4 kartus aktyvesnė negu grynasis uranas. Tai leido manyti, kad toje rudoje yra už uraną radioaktyvesnių elementų, tik labai mažai. Elektriniu metodu ir įvairiomis cheminėmis operacijomis (nusodinimu ir filtravimu), iš rūdos buvo palengva išskiriami vis radioaktyvesni komponentai, kol galų gale 1898 m. buvo gauti du junginiai, kuriuose buvo du nauji radioaktyvieji elementai – polonis (Po), chemiškai panašus į bismutą, ir radis (Ra), panašus į barį.
- M. Kiuri išanalizavusi, kaip radioaktyvieji spinduliai nukrypsta magnetiniame lauke, konstatavo, kad tai gali būti trijų rūšių spinduliavimas – spinduliai suskilo į tris pluoštelius, kurie buvo pavadinti α, β ir γ spinduliais. α spinduliai turi teigiamą krūvį, β spinduliai – neigiamą, o γ spinduliai krūvio neturi.

Istorinis įvadas

- 1904 m. E. Rezerfordas nustatė, kad α spinduliai – tai helio branduolių srautas, o jų energija kvantuota. Vėliau paaiškėjo, kad β spinduliai – elektronų, kurių energija nekvantuota, srautas, o γ spinduliai – labai trumpos diskretinio energijos spektro elektromagnetinės bangos.
- Prieš išrandant greitintuvus (1930 m.) šios dalelės buvo bene vienintelės didelės energijos priemonės branduoliams tirti. Iš tikrųjų visi didieji ankstyvosios branduolio fizikos atradimai – atomo branduolinės sandaros nustatymas, branduolinės reakcijos bei neutrono atradimas – pasidarė galimi tik panaudojus α daleles kaip atominius sviedinius, turinčius didžiulę energiją.

Istorinis įvadas

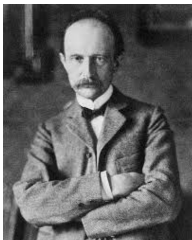
- E. Rezerfordui 1911 m. atradus atomo branduolį, iš karto paaiškėjo, kad būtent branduolys ir kinta radioaktyviojo skilimo metu. 1913 m. E. Rezerfordo mokinys H. Mozlis eksperimentiškai įrodė, kad atomo branduolio elektros krūvis yra tiesiog proporcingas atomo eilės numeriui Z periodinėje elementų lentelėje ir išreiškiamas sandauga Ze. Atomo branduolio krūvis yra pati svarbiausia jo charakteristika. Keičiantis branduolio krūviui, vienas cheminis elementas virsta kitu. Reiškia atomo branduolys yra sudėtinis.
- 1919 m. E. Rezerfordas, α dalelėmis apšaudydamas azoto branduolius, atrado protoną (protos – gr. pirmas), o 1932 m. anglų fizikas Dž. Čedvikas – neutroną. Tai jau buvo prielaidos atomo branduolio sandarai išaiškinti.

Istorinis įvadas

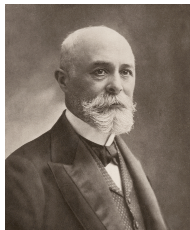
Priminsime, kad iki to laiko fizikoje buvo padaryti ir kiti labai svarbūs atradimai:

- 1895 m. V. K. Rentgenas atrado X spindulius,
- 1897 m. Dž. Dž. Tomsonas atrado laisvąjį elektroną,
- 1900 m. M. Plankas įvedė šviesos kvantų sąvoką,
- 1905 m. A. Einšteinas padarė prielaidą, kad šviesa ne tik spinduliuojama ir sugeriama kvantais, bet ji ir sudaryta iš dalelių – fotonų, sukūrė specialiąją reliatyvumo teoriją bei nustatė masės ir energijos proporcingumo dėsnį,
- 1911–1913 m. sukurtas Boro ir Rezerfordo planetinis atomo modelis,
- 1916 m. A. Einšteinas paskelbė bendrąją reliatyvumo teoriją, o iki 1927 m. buvo sukurti kvantinės mechanikos pagrindai.
- 1932 m. rusų fizikas D. Ivanenka ir vokiečių fizikas V. Heizenbergas nepriklausomai vienas nuo kito paskelbė hipotezę, kad atomo branduolys yra tarpusavyje sąveikaujančių protonų (p) ir neutronų (n) sistema. Šios abi branduolio sudėtinės dalelės dar vadinamos *nukleonais* (nucleus – lot. branduolys).

Istorinis įvadas



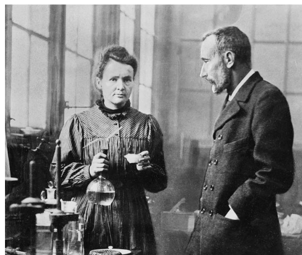
M.Plankas



A. A. Bekerelis



A. Einšteinas



M. ir P. Kiuri

Istorinis įvadas

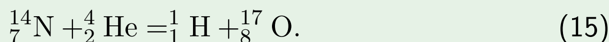
Galima išskirti keletą branduolio fizikos raidos periodų, kurių kiekvienam pagal tuometinį mokslo lygį būdingi tam tikrų vyraujančių mokslo krypčių tyrimai ir atradimai. Kiekvienas periodas prasidėjo kokiu nors labai svarbiu atradimu, papildančiu mokslą naujomis žiniomis ir idėjomis.

- Pirmasis periodas (1896–1912 m.) truko nuo radioaktyvumo atradimo iki atomo branduolinės sandaros ištyrimo. Šiuo laikotarpiu atrasti radioaktyviojo skilimo dėsniai, aptikta 30 radioaktyviųjų elementų, ištirta α ir β spindulių kilmė, konstatuoti radioaktyviųjų elementų izotopai. Eksperimentinės technikos srityje išrasti skaitikliai ir Vilsono (C. T. R Wilson) kamera dalelių pėdsakams stebėti ir fotografuoti.
- Antrasis periodas (1913–1918 m.) truko nuo atomo branduolio atradimo iki pirmosios branduolinės reakcijos. E. Rezerfordas, ištyręs α dalelių sklaidą, įrodė, kad atomas turi branduolinę sandarą, nustatė branduolio dydį. Vėliau buvo atrasti poslinkio dėsniai, galutinai sutvarkytos 3 radioaktyviųjų elementų šeimos, nustatyta, kad branduolio krūvis Z yra lygus elemento numeriui periodinėje elementų sistemoje, atrasti pirmieji nerodioaktyvieji izotopai ^{20}Ne ir ^{22}Ne.

Istorinis įvadas

- Trečiasis periodas (1919–1932 m.) truko nuo pirmosios branduolinės reakcjos iki neutrono atradimo. Panaudodamas α daleles kaip atominius sviedinius E. Rezerfordas įvykdė pirmąją branduolinę reakciją

Pirmoji brandulinė reakcija



$$ {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} = {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{17}_{8}\mathrm{O}. \quad (15) $$

Buvo atrasti branduolių magnetiniai momentai, daug naujų stabiliųjų izotopų (F. V. Astonas (F. W. Aston) ir kt.), numatytas neutrinas (V. Paulis (W. Pauli)). Kvanitnė mechanika atskleidė α skilimo dėsningumus. Periodui baigiantis pradedami konstruoti pirmieji dalelių greitintuvai (ciklotronas, van de Grafo (R. van de Graaf) generatorius).

Istorinis įvadas

- Ketvirtasis periodas (1932–1939 m.) truko nuo neutrono iki branduolio dalijimosi reakcijos atradimo. 1932 m. Dž. Čedvikas (J. Chadwick) atrado neutroną, todėl pagaliau buvo įrodyta, kad branduolį sudaro protonai ir neutronai. 1932 m. atrandamas pozitronas – pirmoji antidalelė, 1934 m. – dirbtinis radioaktyvumas. Sparčiai kuriami vis galingesni greitintuvai vykdyti daugybei naujų branduolinių reakcijų, kurių metu atrasta daug naujų radioaktyviųjų branduolių. Atrandami mezonai. Pradedama detaliai tirti kosminius spindulius.
- Penktojo periodo (nuo 1939 m.) pradžia – urano branduolio dalijimosi reakcijos atradimas. Tiriama grandininė dalijimosi reakcija ir jos, kaip energijos šaltinio, panaudojimo galimybės, konstruojami pirmieji branduoliniai reaktoriai. Sukuriama galinga branudolinė energetika, branduolini ginklas. Pasiekta labai didelė pažanga tiriant elementariąsias daleles, jų sandarą (kvarkų, partonų hipotezė).

Turinys

1. Rentgeno spinduliai
   - Elektromagnetiniai spinduliai
   - Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
   - Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
   - Mozlio dėsnis
   - Rentgeno spindulių taikymas
2. Įvadas į atomo branduolio fiziką
   - Istorinis įvadas
   - Nukleonai
   - Branduolio sandara
   - Branduolio spindulys ir tankis
   - Mikropasaulio reiškinių masteliai

Nukleonai

Protonas yra vandenilio atomo (pročio) branduolys. Tai stabili subatominė dalelė. Ji turi elementarų teigiamą elektros krūvį $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Protono masė

Protono masė

$$m_p = 1,672623 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 1836,152\ m_e \approx 1,007276\ u; \qquad (16)$$

čia $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg $= 5,4859 \cdot 10^{-4}$ u – elektrono masė, u – unifikuotas atominis masės vienatas (a.m.v), lygus anglies–12 ($^{12}_{6}$C) nuklido pagrindinės būsenos neutraliojo atomo rimties masės 1/12 daliai: $1u = \frac{1}{12} M_{^{12}\mathrm{C}} = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.

Nukleonai

Dalelių masės aukštųjų energijų fizikoje dabar dažnai išreiškiamos energijos vienetais – elektronvoltais (eV) ir jo kartotiniais kiloelektronvoltais (keV), megaelektronvoltais (MeV), gigaelektronvoltais (GeV) bei teraelektronvoltais (TeV):

Energijos vienetai

$$\begin{aligned}
&1~\mathrm{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}~\mathrm{J}, \\
&1~\mathrm{keV} = 10^{3}~\mathrm{eV}, \\
&1~\mathrm{MeV} = 10^{6}~\mathrm{eV} = 1,602 \cdot 10^{-13}~\mathrm{J} = 4,45 \cdot 10^{-20}~\mathrm{kWh}, \\
&1~\mathrm{GeV} = 10^{9}~\mathrm{eV}, \\
&1~\mathrm{TeV} = 10^{12}~\mathrm{eV}.
\end{aligned} \tag{17}$$

Išreiškiant dalelių mases energijos vienetais yra pasinaudojama Einšteino sąryšiu tarp energijos ir masės $E = mc^2$ ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s – šviesos greitis vakuume).

Taigi, protono masė energijos vienetais $m_p = 938,272$ MeV, o atominės masės vienetas 1 u = 931,50 MeV. Vertinant apytiksliai 1 MeV≈0,001 u.

Nukleonai

Neutronas (neutron – lot. niekatras) yra elektriškai neutrali subatominė dalelė, kurios masė

Neutrono masė

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}\ \mathrm{kg} = 1838,65\ m_e = 1,008665\ u = 939,57\ \mathrm{MeV}. \tag{18}$$

Taigi, neutrono masė didesnė už protono masę dydžiu $m_n - m_p = 2,5\ m_e = 1,3$ MeV.

Nukleonai

- Neutronas ir protonas turi infrastruktūrą, todėl tai (griežtai sakant) nėra elementariosios dalelės.
- Dėl to, kad neutrono rimties masė yra didesnė už protono masę, laisvas neutronas yra nestabilus. Veikiant vadinamajai silpnajai sąveikai laisvas neutronas spontaniškai virsta protonu, išspinduliuodamas elektroną ir elektroninį antineutriną.

Neutrono virtimo protonu reakcija

$$n \to p + e^{-} + \overline{\nu}_e \tag{19}$$

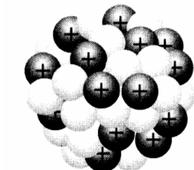
Šios ir keletas kitų savybių leidžia abi daleles laikyti viena dalele, vadinama nukleonu, kuri gali egzistuoti dviejose būsenose – kaip protonas (turintis elektrinį krūvį) ir kaip neutronas (nukleonas be krūvio). Taigi, nukleonas neutrono būsenoje negali būti stabilus, o turi pereiti į žemesnę energinę būseną – virsti protonu. Todėl gamtoje nerandama laisvųjų neutronų. Laisvųjų neutronų gyvavimo pusamžis apie 15 min.

Turinys

1. Rentgeno spinduliai
   - Elektromagnetiniai spinduliai
   - Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
   - Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
   - Mozlio dėsnis
   - Rentgeno spindulių taikymas
2. Įvadas į atomo branduolio fiziką
   - Istorinis įvadas
   - Nukleonai
   - Branduolio sandara
   - Branduolio spindulys ir tankis
   - Mikropasaulio reiškinių masteliai

Branduolio sandara

Po neutrono atradimo paaiškėjo, kad visi branduoliai sudaryti iš protonų ir neutronų.



Atomo branduolio modelis. Branduolį sudaro spiečius teigiamai įelektrintų protonų ir elektrinio krūvio neturinčių neutronų. Juos visus branduolyje išlaiko branduolinės (stipriosios sąveikos) jėgos.

Branduolio sandara

Branduolio sudėčiai apibrėžti vartojami 3 skaičiai:

1. protonų skaičius Z, vadinamas *atominiu skaičiumi*, kuris nusako atomo eilės numerį periodinėje lentelėje ir branduolio krūvį;
2. *neutronų skaičius* N ir
3. *masės skaičius* $A = Z + N$, lygus nukleonų skaičiui branduolyje.

Protono ir neutrono masės yra labai artimos vienam atominės masės vienetui u. Todėl konkretaus branduolio masės skaičius visada yra labai artimas cheminio elemento atominei masei ir randamas atomo masę suapvalinant iki sveikojo skaičiaus.

Branduolio sandara

- *Nuklidas* – apibrėžta branduolių rūšis su nurodytu protonų ir neutronų skaičiumi. Nuklidai žymimi cheminiu ženklu su dviem indeksais, t.y. ${}^{A}_{Z}$X. Pavyzdžiui, ${}^{2}_{1}$H, ${}^{4}_{2}$He, ${}^{235}_{92}$U ir t.t. Apatinis indeksas rodo protonų skaičių, o viršutinis, rašomas kairėje arba dešinėje – pilną nukleonų skaičių. Šiuo metu žinoma 267 stabilūs nuklidai ir apie 1300 nestabiliųjų nuklidų.
- To paties cheminio elemento branduoliai su skirtingu neutronų skaičiumi vadinami *izotopais*. Cheminiai elementai yra kelių ar net keliolikos izotopų mišinys. Todėl jų masės skaičiai – trupmeniniai. Vienas izotopas nuo kito skiriasi fizikinėmis savybėmis: skirtingos masės, vieni gali būti stabilūs, kiti radioaktyvūs, gali skirtis branduolių elektriniai ir magnetiniai momentai ir kt. Kad branduolys būtų stabilus, reikalinga tam tikra pusiausvyra tarp protonų ir neutronų skaičiaus branduolyje. Jei vienų iš jų yra per daug – jie virsta kitais, kol pasiekiama stabilios pusiausvyros būsena.

Branduolio sandara

- Jeigu branduolyje per daug neutronų, vyksta virsmas (β^- skilimas)

β^- skilimas

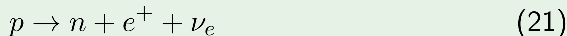
$$n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu}_e \tag{20}$$

t.y. neutronas virsta protonu, iš branduolio išlekia elektronas e^-, kaip $\beta^{˘}$ dalelė ir elektroninis antineutrinas $\overline{\nu}_e$. Branduolyje neutronų skaičius sumažėja vienetu, o protonų vienetu padidėja. Nuklidas periodinėje elementų lentelėje pasislenka per vienetą į dešinę: $Z \rightarrow Z + 1$.

Branduolio sandara

- Jei branduolyje per daug protonų, tai vienas iš jų gali virsti neutronu, ir virsmo

β^+ skilimas



$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \tag{21}$$

metu atsiranda pozitronas (antielektronas) e^+ bei elektroninis neutrinas ν_e. Tai β^+ skilimas. Procesų (20) ir (21) metu galioja:
1) krūvio tvermės dėsnis,
2) dalelių ir antidalelių tvermės dėsnis.
Abu šie procesai vyksta branduolio viduje.

Turinys

1. Rentgeno spinduliai
    - Elektromagnetiniai spinduliai
    - Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
    - Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
    - Mozlio dėsnis
    - Rentgeno spindulių taikymas
2. Įvadas į atomo branduolio fiziką
    - Istorinis įvadas
    - Nukleonai
    - Branduolio sandara
    - Branduolio spindulys ir tankis
    - Mikropasaulio reiškinių masteliai

Branduolio spindulys ir tankis

Eksperimentiškai nustatyta, kad atomo branduolys yra beveik rutulio formos. Branduolio spindulys pirmą kartą buvo įvertintas tiriant α dalelių sklaidą. Dabar yra ir daugiau metodų branduolio spinduliui išmatuoti. Eksperimentai rodo, kad branduolys neturi griežtai apibrėžtų sienelių, o artėjant nuo branduolio vidurio prie jo paviršiaus, branduolinės medžiagos tankis laipsniškai mažėja ir susidaro apie 2,5 fm $= 2,5 \cdot 10^{-15}$ m paviršinis sluoksnis. Tyrimais nustatyta, kad branduolio tūris yra proporcingas nukleonų skaičiui branduolyje A.

Vidutiniu branduolio spinduliu įprasta laikyti

Branduolio spindulys

$$R = 1,3 \cdot 10^{-15} A^{1/3} \text{ m} \tag{22}$$

Branduolio spindulys ir tankis

Branduolio masė $m_b \approx Am_n = 1,67 \cdot 10^{-27} A$ kg apytiksliai lygi nukleonų masių sumai, o jo tūris $V \approx (4/3)\pi R^3 \approx 9 \cdot 10^{-45} A$ m^3. Taigi, branduolio medžiagos tankis

Branduolio tankis

$$\rho_b = \frac{m_b}{9 \cdot 10^{-45} \mathrm{m}^3} \approx 2 \cdot 10^{17} \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} = 2 \cdot 10^5 \frac{\mathrm{t}}{\mathrm{mm}^3} \quad (23)$$

yra labai didelis, lyginant su kūnų tankiu $\rho \sim 10^3 - 10^4$ kg/m^3.

Eksperimentiškai nustatytas nukleono spindulys $R_n \approx 0,8$ fm. Taigi, nukleono tankis yra apie 4 kartus didesnis už branduolio tankį.

Turinys

1 Rentgeno spinduliai
- Elektromagnetiniai spinduliai
- Stabdomasis Rentgeno spinduliavimas
- Būdingoji Rentgeno spinduliuotė
- Mozlio dėsnis
- Rentgeno spindulių taikymas

2 Įvadas į atomo branduolio fiziką
- Istorinis įvadas
- Nukleonai
- Branduolio sandara
- Branduolio spindulys ir tankis
- Mikropasaulio reiškinių masteliai

Mikropasaulio reiškinių masteliai

- Branduolio fizikoje tinkamiausiu ilgio vienetu pasidarė maždaug atomo branduolio dydis. Tai yra femtometras arba fermis: 1 fm = 1 fermis = 10^{-15} m. Juo mažesnė objekto sandara tiriama, tuo didesnės energijos dalelių tam reikia. Dabar gaunama duomenų apie nukleonų sandarą iki 0,01 fm = 10 am išskyrimu. (1 am = 1 atometras = 10^{-18} m).
- Anksčiau gavome, kad charakteringoji atominė trukmė yra $\tau_0 = a_0/v_0 \approx 2,4 \cdot 10^{-17}$ s. Branduolio fizikoje susmulkėja ir laiko skalė. Labai greitų dalelių greitis v priartėja prie šviesos greičio $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, o daugumos dalelių matmenys yra apie 1 fm. Taigi, charakteringoji branduolinė trukmė apytiksliai yra $3 \cdot 10^{-24} - 10^{-22}$ s – apie $10^5 - 10^7$ karto trumpesnė negu atominė trukmė. Tai nėra fizikos konstanta, o priklauso nuo dalelių ir jų energijos.
- Branduolio fizikai charakteringus masės ir energijos vienetus įvedėme anksčiau.